

СОВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ УСКОРЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Наводиться огляд та приклади виконуваних в НТУ «ХПІ» розробок з прискореного виготовлення складної модельної оснастки на основі застосування лазерних технологій послідовного генеративного формоутворення. Розробки підтримуються методикою прогнозування часу повного циклу виготовлення виробів для прийняття обґрунтованих рішень на ранніх стадіях планування та організації виробництва.

Ключові слова: модельна оснастка, прискорене виготовлення, лазерна стереолітографія, селективне лазерне спекання, час повного циклу, прогнозування.

Приводиться обзор и примеры выполняемых в НТУ «ХПИ» разработок по ускоренному изготовлению сложной модельной оснастки на основе применения лазерных технологий послойного генеративного формообразования. Разработки поддерживаются методикой прогнозирования времени полного цикла изготовления изделий для принятия обоснованных решений на ранних стадиях планирования и организации производства.

Ключевые слова: модельная оснастка, ускоренное изготовление, лазерная стереолитография, селективное лазерное спекание, время полного цикла, прогнозирование.

An overview and examples of carried out in the NTU "KPI" development of the composite pattern equipment rapid manufacturing based on the use of laser technology layered generative morphogenesis are presented. The development is supported by the methods of forecasting the full cycle time of manufacturing of products to make informed decisions in the early stages of planning and organization of production.

Keywords: model tooling, rapid manufacturing, laser stereolithography, selective laser sintering, full-time, forecasting.

Введение. Роль скорости материализации конструкторских решений в конкурентном развитии промышленности особенно возросла в соответствующих нынешнему пятому и зарождающемуся на его базисе шестому технологическому укладу [1] условиях глобализации экономики и открытого информационного пространства. Основанная на лазерном спекании порошковых композиций техническая идеология быстрого прототипирования послойным формообразованием [2] заданных электронным чертежом или аналитически виртуальных конструкций, а также отображенных сканированием трехмерных реальностей сегодня реализуется в широкой гамме оборудования различных производителей применительно к производству твердотельных объектов из различных материалов – от полимеров до твердых сплавов.

Представленные статьи разработки опираются на практику Конструкторско-технологического бюро верификационного моделирования и подготовки производства, которое в рамках Учебно-научно-производственного объединения «Высокие технологии в машиностроении» при НТУ «ХПИ» является полигоном исследований по НИР «Разработка метода статистического

298

прогнозирования времени полного цикла рабочих процессов технологий лазерной стереолитографии (SLA) и селективного лазерного спекания (SLS)» (2010-2012 гг., научный руководитель профессор Грабченко А.И., номер государственной регистрации 0110U001237 (шифр M2237 в НТУ «ХПИ»). Страной-экспортером для этого КТБ первого в Украине оборудования реализации технологий SLA и SLS стала в 2001 г. Германия (3D Systems GmbH) – современный лидер европейской экономики и наиболее успешная европейская страна в условиях преодоления испытаний мировым кризисом последних лет, что не может не определять оценку актуальности и качества выполняемых в этой стране индустриальных проектов и научных исследований.

По данным одного из них, являющегося непосредственным предшественником темы M2237 и выполненного воспитанницей научной школы физики процессов резания НТУ «ХПИ» и диссертантом Магдебургского университета Кушнарченко О.Н. [3], а также сайта www.werkzeug-formenbau.de в немецкоязычном сегменте Интернет, собственно германский опыт техники и технологий быстрого прототипирования генеративным металлургическим формообразованием опирается на 5 основных предприятий и 10 основных поставляемых ими технологических установок (систем): кроме упомянутого выше предприятия-партнера КТБ из УНПО «Высокие технологии в машиностроении» 3D Systems GmbH (Darmstadt) с его 3D Systems Vanguard Anlage и Sinterstation 2500 plus. 230 SLS, это Concept Laser GmbH (Lichtenfels) с установками M1 CUSING, M2 CUSING, M3 Linear; EOS GmbH (Krailling) с установками EOSINT M 250 Xtended и EOSINT M 270; MCP Group HEK GmbH (Borchen) с установками MCP Realizer 100 и MCP Realizer 250; Trumpf Laser und Systemtechnik GmbH (Ditzingen) с установками Trumaform LF 250 и Trumaform DMD 505. Рабочими металлами формообразования в возможных этих установках являются конструкционные и инструментальные стали, в том числе высококачественные и специальные, а также цветные (Ti, Al, Cu и др.) и чугуны.

Наше представление о современной организации ускоренного изготовления сложной модельной оснастки в Украине исходит, во-первых, из использования возможностей и адаптирования новейших технологий отечественной практики быстрого прототипирования для таких задач; во-вторых, – из использования адекватной этим возможностям методологии статистического прогнозирования длительности полного цикла генеративного создания изделий. Это представление опирается на собственный [4] и предшественников [5, 6] диссертационный исследовательский опыт, а также на учебно-научно-производственные результаты дипломного проектирования на базе КТБ в составе УНПО «Высокие технологии в машиностроении» и его общую практику [7].

Технологические решения быстрого прототипирования модельной оснастки. Переход к порошковым технологиям лазерного спекания модельной

оснастки потребовал проведения специальных материаловедческих исследований, ввиду неочевидности поведения традиционных материалов быстрого прототипирования при их использовании в изготовлении модельной оснастки в условиях литейного производства, где формообразующие элементы как кокилей, так и пресс-форм работают в условиях сложного термоциклического нагружения. В результате обоснован выбор определенных композиционных металлических порошков (КМ) для целевого формообразования ответственных деталей модельной оснастки лазерным спеканием при их послойном формообразовании, учитывающий специфику эксплуатации модельной оснастки и обеспечивающий ее высококачественную долговечность. Например, КМ_{Fe-Cr} рекомендовано использовать как материал литейной оснастки для литья алюминиевых сплавов в единичном производстве, а КМ_{Fe-W} – для изготовления кокилей и пресс-форм при массовом производстве алюминиевых сплавов и тонкостенных чугунных отливок. Для получения литейной оснастки с повышенным сроком службы предложено инфильтрацию проводить хромистой бронзой, поддерживающей высокие эксплуатационные свойства модельной оснастки, изготовленной по маршрутной технологии с основным рабочим процессом SLS [4].

С повышением точности и качества изготовления отливок связано введение понятия и применение поправочного коэффициента отклонений размеров (K_0). Конкретные значения K_0 рассчитаны для каждого типа технологий послойного лазерного формообразования, рассматриваемых установок и применяемых в них материалов. Для минимизации размерных отклонений изделий послойного лазерного формообразования от прототипов соответствующие значения K_0 поправки следует взаимосвязано учитывать на стадии проектирования монолитной литейной оснастки (в расчетах размерных цепей) и основных технологий ее генеративного производства.

Для увеличения срока службы литейной оснастки за счет устранения факторов термического напряженного контакта матрицы и вставки, ускоряющего их разрушение в циклической эксплуатации, величину зазора между вставкой и матрицей предложено выбирать с учетом максимального эксплуатационного значения коэффициента термического расширения материала вставки, что следует учитывать и в виртуальном форморазмерном описании прототипов соответствующих объектов основных рабочих процессов SLS.

В результате разработанных [4] материаловедческих и технологических решений, в комплексе с результатами выполненными в УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ» предшествующих разработок [5, 6], впервые в отечественной практике ориентированных на использование SLS как основного рабочего процесса изготовления модельной оснастки со сложной формообразующей поверхностью, в Украине стало реальностью ее высокотехнологичное ускоренное производство, обеспечивающее ей продолжительный срок службы и высокие эксплуатационные качества, позволяющие

производить отливки с улучшенной размерной и микрогеометрической инженерией поверхностей, минимальным исходной металлоемкостью и припусками на окончательную механическую обработку. Пример отображения (общий вид) форморазмерного задания литейной формы в программном пакете Solid Cast с системным использованием метода разности конечных элементов для постановки производственной задачи быстрого прототипирования приведен на рис. 1.

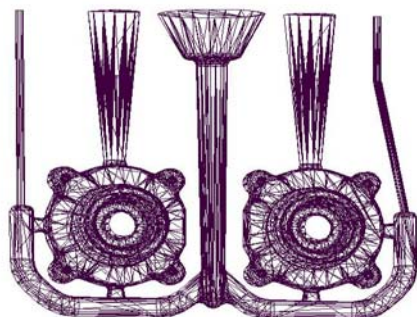


Рисунок 1 – Отливка «Крышка» с литниковопитывающей системой: сеточная 3D модель (Solid Cast, [4])

Применение технологии SLS позволило в практике КТБ УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ» [4] отойти от традиционного модельного комплекта с подмодельной плитой и формирующим внутреннюю полость заготовки стержневым ящиком и перейти к прогрессивному модельному модулю литья в песчаные формы из единого основного формообразующего элемента (рис. 2) с понижением припуска на последующую обработку благодаря избавлению от погрешности соосности сопрягаемых стержней при сборке традиционной модельной оснастки.

Переход к производимым по технологии SLS модельным модулям позволяет конструировать разъемы любой степени сложности, выполнять внутренний контур отливки при минимальной величине погрешностей расположения, значительно уменьшить несоосность между моделью и стержнями, минимизировать погрешности формы и расположения модуля в сборе. Из опытно-экспериментальной апробации разработки новая технология литья в песчаные формы на основе модельных модулей, полученных методом SLS, позволяет на 30 – 40% повысить точность отливки, в 4 – 5 раз снизить шероховатость ее поверхности, значительно сократить объем механических опера-

ций окончательной обработки. Значительное повышение качества отливок сочетается при этом с ощутимой экономией металла в их производстве.

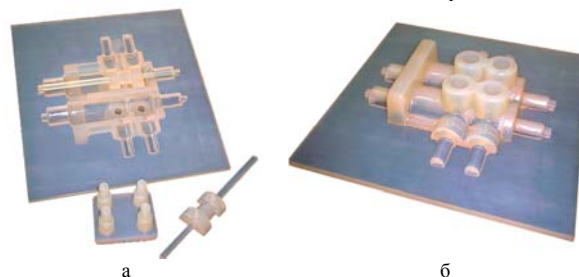


Рисунок 1 – Рольевые варианты исполнения модельного модуля: стержневой ящик с дополнительными элементами-фиксаторами (а) и модель с подмодельной плитой (б). Лазерная стереолитография на установке SLA-5000 (3D Systems GmbH): КТБ УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ»

Прогнозирование времени полного цикла. Предварительные расчетные оценки времени полного цикла изготовления модельной оснастки маршрутными технологиями, основанными на селективном лазерном спекании, осуществляются в соответствии с выполненной в НТУ «ХПИ» под руководством проф. Грабченко А.И. и защищенной [6] разработкой.

Пример параметрического детерминирования обобщенной расчетной схемы применительно к конкретной задаче приведен в табл. 1, а пример комплексной прогностической оценки, включающей определение риска выполнения проекта послышного создания изделий в установленные сроки, – в табл. 2. Оба примера взяты из реальной практики дипломного проектирования в системе подготовки специалистов в НТУ «ХПИ» на материальной базе УНПО «Высокие технологии в машиностроении» и представлены по материалам дипломных проектов специалистов инженерной механики, подготовленных студентами Крысаном М.А. (тема дипломного проекта: Разработка технологического процесса ускоренного изготовления деталей типа «маховик» для шлифовальных станков производства ООО «ХАРВЕРТ», руководитель проф. Добросок В.Л., выпуск 2010 г.) и Балабасом Г.Г. (тема дипломного проекта: Проектирование цеха и разработка технологического процесса по изготовлению детали «щека» гидрогенератора СВ 1140-280-48УХЛ4», руководитель к.т.н. Витязев Ю.Б., выпуск 2012 г.).

В табл. 2, наряду с результатами автоматизированного расчета статистических ожиданий длительности звеньев и всей временной цепи в полном цикле изготовления изделия по рассматриваемому учебно-научно-

производственному примеру, представлены их фактические длительности в практических реализациях на производственной базе Конструкторско-технологического бюро верификационного моделирования и подготовки производства при УНПО «Высокие технологии в машиностроении» НТУ «ХПИ». Сопоставление предварительных расчетных оценок с последующей реальностью подтверждает высокую эффективность разработанной [6] прогностической методики.

Таблица 1 – Элементная параметризация при прогнозировании полного цикла изготовления изделия: объект изготовления – маховик, основная технология – SLS (по материалам дипломного проекта студента Крысана М.А.)

Эле-мент [6]	Типы и значения параметров (ДП и СП – детерминированные (ДП) и стохастические (СП) параметры соответственно)
T_{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий – СП (нечеткий) Par1: распределение $Triang(x, X_{min}=2,000\text{ E1}, X_{mod}=3,200\text{ E1}, X_{max}=4,000\text{ E1})$
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 (очистка) – ДП Par3: значение 1,0000 E2
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 (инфильтрация) – СП (нечеткий) Par4: распределение $Trapez(x, X_{min}=2,00\text{ E1}, X_{mod}=2,400\text{ E1}, X_{max}=2,800\text{ E1}, X_{max}=3,200\text{ E1})$
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 (доводка) – ДП Par3: значение 1,5000 E1
T_{Home}	подготовит. операции – СП Par6: распределение $Rand(x, X_{min}=2,500\text{ E0}, X_{max}=4,500\text{ E0})$
T_{End}	заклучит. операции – СП Par7: распределение $Rand(x, X_{min}=1,000\text{ E1}, X_{max}=0,200\text{ E0})$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделием по оси Y – ДП Par8: значение 3,500 E2
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделием по оси Z – ДП Par9: значение 6,000 E1
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделием – ДП Par10: значение 2,500 E3
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделием – СП Par11: распределение $Rand(x, X_{min}=0,700\text{ E1}, X_{max}=0,800\text{ E0})$
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y – СП Par12: распределение $Rand(x, X_{min}=0,300\text{ E0}, X_{max}=0,700\text{ E0})$
D_L	диаметр пятна лазерного луча – СП Par13: распределение $Rand(x, X_{min}=0,230\text{ E0}, X_{max}=0,270\text{ E0})$
V_L	скорость луча лазера – СП Par14: распределение $Rand(x, X_{min}=6,000\text{ E3}, X_{max}=8,000\text{ E3})$
h_C	толщина формируемого единичного слоя – ДП Par15: значение 0,150 E0

Продолжение таблицы 1	
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий – СП Par16: распределение $Rand(x, X_{min}=1,000\text{ E0}, X_{max}=2,000\text{ E0})$
K_{LR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных технологических элементов – ДП Par19: значение 1,000 E0
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий – СП (нечеткий) Par20: распределение $Triang(x, X_{min}=1,000\text{ E-2}, X_{mod}=0,150\text{ E0}, X_{max}=0,200\text{ E0})$
V_P	скорость опускания рабочей платформы – СП (нечеткий) Par22: распределение $Triang(x, X_{min}=1,000\text{ E0}, X_{mod}=2,000\text{ E0}, X_{max}=3,000\text{ E0})$
L_C	длина подвода-перебега выравнивающего элемента установки – СП (нечеткий) Par23: распределение $TriangRight(x, X_{min}=5,000\text{ E0}, X_{max}=1,500\text{ E1})$
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки – СП (нечеткий) Par24: распределение $TriangLeft(x, X_{min}=1,600\text{ E2}, X_{max}=1,900\text{ E2})$
T_{WD}	время выдержки при построении изделий – СП (нечеткий) Par26: распределение $Triang(x, X_{min}=1,000\text{ E1}, X_{mod}=1,200\text{ E1}, X_{max}=1,300\text{ E1})$

Таблица 2 – Сравнительные результаты статистического прогнозирования звеньев и всей временной цепи полного цикла создания модельной оснастки с основной технологией SLS для литейной формы детали «щека» (разработка студента Балабаса Г.Г.)

Звено полного цикла времени изготовления изделия		Трудоемкость, час.	
Рабочий процесс	Символ [6]	Прогноз	Факт
Основной процесс (SLS)	T_{Form}	39,94÷75,88 при уровне риска 5,5%	51
Постпроцесс 1 (очистка)	T_{PP1}	$Rand(x, X_{min}=8, X_{max}=12)$	10
Постпроцесс 2 (инфильтрация)	T_{PP2}	$Rand(x, X_{min}=2, X_{max}=3,2)$	2,6
Постпроцесс 3 (доводка)	T_{PP3}	$Rand(x, X_{min}=12, X_{max}=16)$	15
Полный цикл	T_{Sigma}	38,61÷72,43 при уровне риска 5,4%	61

Заключение. Использование техники и технологий быстрого прототипирования с послышным выращиванием изделий посредством избирательного лазерного плавления-спекания позволяет получать высокотехнологичную и

долговечную модельную оснастку со сложной формообразующей поверхностью при значительном сокращении сроков ее изготовления и обеспечении высокого уровня размерной точности, плотности и качества поверхности отливков. Применение методики статистического прогнозирования длительности полных циклов рабочих процессов генеративного создания изделий SLA и SLS на стадии их проектирования поддерживает конкурентоспособность технологических альтернатив быстрого прототипирования перед конвенциональными технологиями изготовления модельной оснастки на ранних стадиях принятия обоснованных организационно-производственных решений.

Список использованных источников: 1. Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science: NSF/DOC – sponsored report / Ed. by *M. C. Roco* and *W. S. Bainbridge*. – Arlington, Virginia: National Science Foundation, June 2002. – 424 p. – <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/1/NBIC-report.pdf>. 2. *Jacobs P.F.* Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. – USA: SME, 1992. – 434 p. 3. *Kushnarenko O.* Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieurin / Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung – der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Band 14. – Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2009. – 167 s. 4. *Тринева Т.Л.* Технологические процессы изготовления литейной оснастки с использованием методов быстрого прототипирования: дис. ... канд. техн. наук: 15.16.04 – литейное производство. – Харьков, 2009. – 200 с. 5. *Витязев Ю.Б.* Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения. – Харьков, 2004. – 228 с. 6. *Чернышов С.И.* Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения. – Харьков, 2006. – 322 с. 7. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / *Л.Л. Товажнянский, А.И. Грабченко, С.И. Чернышов, Н.В. Вереzub, Ю.Б. Витязев, В.Л. Доброскок, Х. Кнут, Ф. Лиерат*; под ред. *Л.Л. Товажнянского и А.И. Грабченко*. – Харьков: ОАО «Модель вселенной», 2005. – 224 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2012